

P 303325

5

Verfahren und Vorrichtung zur Messung der Einspritzrate
eines Einspritzventils für Flüssigkeiten

10

Stand der Technik

15

20

25

30

Bei der Fertigungs- und Funktionsprüfung von Kraftstoff-Einspritzkomponenten, wie beispielsweise von Einspritzventilen, Common-Rail-Injektoren und anderen Hochdruckeinspritzventilen, sind zur Mengenmessung verschiedene Prüfvorrichtungen und -verfahren im Stand der Technik beschrieben. So ist beispielsweise aus der DE 100 64 511 A1 das Messkolbenprinzip bekannt, bei dem das Einspritzventil Kraftstoff in ein mit einem Prüfmedium gefülltes Messvolumen einspritzt. Der Druck in dem Messvolumen wird konstant gehalten, indem ein Messkolben durch die Einspritzmenge verdrängt wird. Aus der Verschiebung des Messkolbens kann dann unmittelbar die Einspritzmenge berechnet werden. Dieses Verfahren ist wegen der mechanischen Kolbenbewegung dynamisch begrenzt und kann dadurch die steigenden Anforderungen nach zeitlich hochaufgelöster Messung der Einspritzrate bei modernen Hochdruck-Einspritzsystemen für Brennkraftmaschinen, die pro Einspritzzyklus häufig mehrere Teileinspritzungen umfassen, nicht erfüllen.

35

Ein alternatives und genaues Verfahren, wie es beispielsweise in W. Zeuch: „Neue Verfahren zur Messung des Einspritzgesetzes und der Einspritz-Regelmäßigkeit von Diesel-Einspritzpumpen“, Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 22 (1961), S. 344-349, beschrieben ist, ist das hydraulische

Druckanstiegsverfahren (HDV). Hierbei spritzt das Einspritz-
ventil ebenfalls in ein flüssigkeitsgefülltes Messvolumen
ein, jedoch wird hier das Messvolumen konstant gehalten. Da-
durch kommt es zu einem Druckanstieg im Messvolumen, was mit
5 einem geeigneten Drucksensor gemessen wird. Moderne Druck-
sensoren auf Piezo-Basis zeichnen sich dabei durch eine sehr
kurze Ansprechzeit aus, was zeitlich hochaufgelöste Messun-
gen möglich macht. Aus dem zeitlichen Verlauf des Druckan-
stiegs lässt sich im Prinzip der Verlauf der Einspritzrate
10 und die eingespritzte Menge berechnen.

In der Praxis wird dies jedoch durch eine Reihe von Faktoren
erschwert: Im Messvolumen V kommt es durch den eingespritz-
ten Kraftstoff zu Druckschwingungen in den entsprechenden
15 Eigenfrequenzen des Messvolumens, wobei diese Eigenfrequen-
zen von den geometrischen Abmessungen des Messvolumens ab-
hängen. Neben der Grundschiwingung werden in der Regel auch
viele Oberschwingungen angeregt, wobei in der Regel mehrere
Schwingungsmoden möglich sind. Dies erschwert eine Filterung
20 des Drucksensor-Messsignals, da die Frequenzen der Eigen-
schwingungen zum Teil im Bereich der Frequenzen des Messsig-
nals liegen.

Weiter wird eine genaue Messung des Absolutwerts der Ein-
25 spritzmenge Δm dadurch erschwert, dass die Messgröße des
Drucks erst auf die eingespritzte Flüssigkeitsmenge umge-
rechnet werden muss. Die Umrechnungsfaktoren beinhalten
hierbei den Kompressionsmodul und die Dichte. Diese Größen
hängen von den jeweiligen Prüfbedingungen und der Vorge-
30 schichte ab und stehen deshalb nicht mit der notwendigen Ge-
nauigkeit aus früheren Messungen zur Verfügung. Um diese
Größen zu ermitteln ist für jede Messung ein separater, auf-
wendiger Kalibriervorgang nötig, was die Messung umständlich
und in der Praxis schwer durchführbar macht. Hierzu wird ü-
35 ber einen separaten Kalibrierzylinder ein definiertes Kalib-
rier-Volumen ΔV_k in das Messvolumen V eingebracht und die

Druckänderung Δp_k gemessen. Der Kompressionsmodul K ergibt sich dann aus der Beziehung

$$K = \Delta p_k / \Delta V_k \cdot V \quad (I)$$

5

Damit lässt sich jetzt das eingespritzte Volumen ΔV berechnen:

$$\Delta V = V / K \cdot \Delta p$$

10

Um letztendlich die Einspritzmenge zu berechnen ist eine Umrechnung auf die Masse erforderlich, was die Kenntnis der Dichte ρ notwendig macht:

15

$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V = V \cdot \rho / K \cdot \Delta p$$

20

Hierbei hängt die Dichte von der Temperatur des Prüfmediums ab. Um dies zu berücksichtigen wird die Temperatur mittels eines Temperatursensors im Messvolumen gemessen und die Dichte entsprechend korrigiert. Die Temperaturmessung ist dabei punktuell und berücksichtigt nicht eine eventuell ungleiche Temperatur im gesamten Messvolumen.

25

Für die Ermittlung des Kompressionsmoduls K nach der angegebenen Gleichung (I) ist die Einbringung eines definierten Kalibrier-Volumens in das Messvolumen notwendig, was einen separaten Volumengeber nötig macht. Darüber hinaus ergibt sich der Nachteil, dass für die Kalibriermessung eine separate Messzeit notwendig ist, was die mögliche Frequenz von aufeinanderfolgenden Messungen reduziert.

30

Vorteile der Erfindung

35

Das erfindungsgemäße Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 weist demgegenüber den Vorteil auf, dass sich aus dem Druckverlauf in einfacher Weise die Einspritzmenge

bestimmen lässt. Hierzu wird der zeitliche Verlauf des Drucks im Messvolumen bei der Einspritzung aufgezeichnet und daraus der zeitliche Verlauf der Einspritzmenge berechnet. Um den Faktor zur Berechnung des Absolutwerts der Einspritzmenge zu ermitteln, wird die Schallgeschwindigkeit bestimmt. Aus dem Druckanstieg und der Schallgeschwindigkeit lässt sich dann direkt die Einspritzmenge bzw. deren zeitlicher Verlauf, also die Mengen-Einspritzrate, berechnen.

In einer vorteilhaften Weiterbildung des Verfahrens wird die Schallgeschwindigkeit mittels eines separaten Messvorgangs ermittelt, bei dem ein Schallimpuls von einem Schallgeber in das Messvolumen abgegeben wird und durch den Drucksensor aufgefangen wird. Sind der Schallgeber und der Drucksensor einander gegenüber angeordnet, so lässt sich aus dem Abstand und der Laufzeit direkt die Schallgeschwindigkeit berechnen. Dies ist ein sehr schnelles Messverfahren, das kaum nennenswerte Verzögerungen des Messablaufs bewirkt.

In einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung des Verfahrens werden die Messdaten des Druckverlaufs mit Hilfe eines elektronischen Rechners gespeichert, der auch eine direkte Weiterbearbeitung der Daten möglich macht.

In einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung des Messverfahrens wird aus den Druckmesswerten die Frequenz einer Druckeigenschwingung des Messvolumens bestimmt. Aus der Eigenfrequenz ergibt sich dann die Schallgeschwindigkeit als gemittelte Größe über das gesamte Messvolumen, ohne dass eine separate Messung mit entsprechenden Vorrichtungen nötig wäre. Beispielhaft ist es hierbei möglich, die Frequenzanalyse mit Hilfe eines Fourier-Verfahrens zu berechnen, wobei auch andere, moderne Verfahren möglich sind.

Die Filterung der Druckmesswerte wird beispielsweise mit einem Tiefpass durchgeführt, so dass Störungen und Rauschen

weitgehend eliminiert werden. Aus der zeitlichen Differentiation des Drucksignals lässt sich dann die Einspritzmengenrate bestimmen.

5 Die erfindungsgemäße Vorrichtung mit den Merkmalen des Patentanspruchs 10 weist gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil auf, dass das Messsignal besser gefiltert werden
10 kann. Hierzu ist der Drucksensor im Druckknoten der ersten Druckeigenschwingung, also der Grundeigenschwingung, angeordnet, so dass der Drucksensor kein Signal der Grundeigenschwingung erfasst. Deshalb kann die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters zur Glättung der Druckmesswerte um einen Faktor zwei nach oben verschoben werden.

15 Zeichnung

In der Zeichnung ist ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Vorrichtung dargestellt. Es zeigt

Figur 1 die Messvorrichtung mit den schematisch dargestellten Komponenten,
20 Figur 2 eine Darstellung des Messvolumens mit dem Druckverlauf der ersten Druckeigenschwingung und
Figur 3 das Diagramm einer Messung, wobei der Druck und dessen Ableitung über der Zeit abgetragen sind.

25

Beschreibung des Ausführungsbeispiels

In der Figur 1 ist die Messvorrichtung in einer teilweise geschnittenen Darstellung gezeigt. Ein zylinderförmiges
30 Messvolumen 1 mit einer Wandung 2 ist mit einer Prüfflüssigkeit vollständig gefüllt, wobei das Messvolumen 1 allseitig abgeschlossen ist. Die Wandung 2 weist eine erste Grundfläche 102 und eine zweite Grundfläche 202 auf, die durch die Seitenwand 303 verbunden sind, welche eine Längsachse 4 aufweist.
35 Durch eine Öffnung 10 in der ersten Grundfläche 102 der Wandung 2 ragt ein Einspritzventil 3 mit seiner Spitze

in das Messvolumen 1, wobei der Durchtritt des Einspritzventils 3 durch die Wandung 2 flüssigkeitsdicht verschlossen ist. Das Einspritzventil 3 weist einen Ventilkörper 7 auf, in dem in einer Bohrung 6 eine kolbenförmige Ventilnadel 5 längsverschiebbar angeordnet ist. Durch eine Längsbewegung der Ventilnadel 5 werden mehrere Einspritzöffnungen 12, die an der in das Messvolumen 1 hineinragenden Spitze des Einspritzventils 3 ausgebildet sind, geöffnet oder geschlossen. Bei geöffneten Einspritzöffnungen 12 strömt Prüfflüssigkeit aus einem zwischen der Ventilnadel 5 und der Wand der Bohrung 6 ausgebildeten Druckraum 9 zu den Einspritzöffnungen 12 und wird von dort in das Messvolumen 1 eingespritzt, bis die Einspritzöffnungen 12 durch die Ventilnadel 5 wieder verschlossen werden. Die Einspritzung der Prüfflüssigkeit erfolgt hierbei mit einem hohen Druck, der je nach verwendetem Einspritzventil bis zu 200 MPa betragen kann.

In die Seitenwand 303 der zylinderförmigen Wandung 2 mündet eine mit einem Druckhalteventil 17 verbundene Leitung 16, durch die Prüfflüssigkeit aus dem Messvolumen 1 in ein in der Zeichnung nicht dargestelltes Leckvolumen abgeleitet werden kann. In der Leitung 16 ist darüber hinaus ein Steuerventil 15 angeordnet, durch das im Bedarfsfall die Leitung 16 verschlossen werden kann, falls eine Ableitung von Prüfflüssigkeit aus dem Messvolumen 1 nicht gewünscht wird. Durch das Druckhalteventil 17 ist sichergestellt, dass ein gewisser Druck im Messvolumen 1 aufrecht erhalten wird und dieses stets völlig mit Flüssigkeit gefüllt bleibt.

Eine Halterung 22 ragt durch die zweite Grundfläche 202 der Wandung 2 in das Messvolumen 1 hinein. Am Ende der Halterung 22 ist ein Drucksensor 20 angeordnet, der über eine Signalleitung 24, die in der Halterung 22 aus dem Messvolumen 1 hinausführt, mit einem elektronischen Rechner 28 verbunden ist, wobei der Durchtritt der Halterung 22 durch die Wandung 2 flüssigkeitsdicht verschlossen ist. Der Drucksensor 20 ist

in der Mittelebene zwischen den beiden Grundflächen 102, 202 der Wandung 2 angeordnet und hat somit zu beiden Grundflächen 102, 202 denselben Abstand. Da der Drucksensor 20 auch auf der Längsachse 4 liegt, weist er zur Seitenfläche 303 einen allseitig gleichen Abstand s auf. Über den elektronischen Rechner 28 kann das Signal, das der Drucksensor 20 liefert, ausgelesen und elektronisch gespeichert werden. Um eine schnelle Messung des Druckverlaufs zu ermöglichen ist der Drucksensor 20 beispielsweise auf Piezo-Basis gebaut, so dass auch schnelle Änderungen des Drucks ohne nennenswerte Verzögerung gemessen werden können. An der Seitenfläche 303 der Wandung 2 ist ein Schallgeber 21 angeordnet, der vom Drucksensor 20 den Abstand s aufweist. Alternativ kann es auch vorgesehen sein, dass ein separater Schallempfänger 30 diametral dem Schallgeber 21 an der Seitenfläche 303 gegenüberliegt, um eine möglichst große Laufstrecke des Schallsignals zu erhalten und damit eine größere Genauigkeit bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit c .

Die zu messende Einspritzmenge Δm der Prüfflüssigkeit kann aus dem Druckanstieg und der Schallgeschwindigkeit berechnet werden. Ist ρ die Dichte der Prüfflüssigkeit und V das Volumen des Messvolumens, so ergibt sich durch das Einspritzen des Einspritzventils bei konstantem Volumen V eine Änderung der Dichte $\Delta \rho$, so dass gilt

$$\Delta m = V \cdot \Delta \rho$$

Nach der bekannten akustischen Theorie ist der Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit c , der Dichteänderung $\Delta \rho$ und dem Druckanstieg Δp wie folgt

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot 1/c^2$$

und damit gilt

$$\Delta m = V \cdot 1/c^2 \cdot \Delta p = V \cdot \rho/K \cdot \Delta p \quad (\text{II})$$

Es gibt also einen direkten Zusammenhang zwischen dem Druckanstieg Δp und der Mengenänderung Δm .

5

Mit dem Drucksensor 20 wird der zeitliche Verlauf des Drucks gemessen, woraus sich wiederum die Einspritzrate $r(t)$ bestimmen lässt, also die pro Zeiteinheit dt eingespritzte Menge $dm(t)$ der Prüfflüssigkeit. Aus dem obigen Zusammenhang ergibt sich damit für die Einspritzrate $r(t)$, also die zeitliche Ableitung der eingespritzten Menge $dm(t)/dt$, folgende Gleichung:

10

$$r(t) = dm(t)/dt = V/c^2 \cdot dp(t)/dt \quad (\text{III})$$

15

Das heißt, dass bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit c und des Volumens V aus dem zeitlichen Verlauf des Drucks $p(t)$ der Absolutwert der Einspritzrate $r(t)$ berechnet werden kann.

20

Beim Einspritzen der Prüfflüssigkeit in das Messvolumen 1, das anfänglich einen konstanten Druck aufweist, der beispielsweise 1 MPa entspricht, steigt der Druck im Messvolumen 1 an. Flüssigkeiten sind im Vergleich zu Gasen praktisch inkompressibel, so dass auch eine kleine Mengenzunahme zu einer gut messbaren Druckerhöhung führt. Durch das stoßartige Einbringen der Prüfflüssigkeit werden im Messvolumen 1 Druckeigenschwingungen angeregt. Die Eigenfrequenzen hängen von den geometrischen Abmessungen des Messvolumens 1 ab: Für die erste Druckeigenschwingung, die sogenannte Grundschiwingung, bei der eine Longitudinalwelle entlang der Längsachse 4 schwingt, ist die halbe Wellenlänge $\lambda/2$ gleich der Länge L des Messvolumens 1, also gilt

25

30

35

$$\lambda = \lambda_e = 2 \cdot L.$$

Figur 2 zeigt diese erste Druckeigenschwingung schematisch, wobei die mit p bezeichneten Linien den Druckverlauf zeigen, bei dem an den Rändern Druckbäuche zu finden sind und in der Mitte, also in der Radialebene des zylinderförmigen Messvolumens, in der der Drucksensor 20 angeordnet ist, ein Druckknoten liegt. Die Frequenz ν_e der ersten Druckeigenschwingung errechnet sich dann einfach aus der Schallgeschwindigkeit c nach der Beziehung $\lambda_e \cdot \nu_e = c$ zu

$$\nu_e = c/\lambda_e = c/(2 \cdot L)$$

Für die Frequenz ν_n der n. Oberschwingung gilt entsprechend, dass die Länge des Messvolumens L ein Vielfaches von $\lambda/2$ sein muss:

$$\nu_n = (n \cdot c)/(2 \cdot L)$$

Der Drucksensor 20 registriert die erste Druckeigenschwingung nicht, da am Druckknoten keine Druckänderungen auftreten. Ebenso wenig werden die 2., 4. und alle anderen geradzahligen Oberschwingungen vom Drucksensor 20 aufgenommen.

Zur Auswertung der Messung geht man folgendermaßen vor: In das Messvolumen 1, in dem sich die Prüfflüssigkeit befindet, spritzt das Einspritzventil 3 durch eine schnelle Längsbewegung der Ventilnadel 5, durch welche die Einspritzöffnungen 12 geöffnet und wieder verschlossen werden, eine bestimmte Flüssigkeitsmenge ein. Der Drucksensor 20 misst den Druck $p(t)$, der mit einer bestimmten Rate von beispielsweise 100 kHz vom Rechner 28 ausgelesen und gespeichert wird.

Um den zeitlichen Verlauf der Einspritzmenge $dm(t)/dt$, also die Einspritzrate $r(t)$ zu bestimmen, benutzt man Gleichung (III). Die im Rechner gespeicherten Messwerte $p(t)$ werden zeitlich differenziert und mit dem Faktor V/c^2 multipliziert, was direkt die Einspritzrate $r(t)$ ergibt.

Neben der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durch eine separate Messung ist es auch möglich, diese aus den gemessenen Druckmesswerten direkt zu bestimmen. Die im Rechner 28 aufgezeichneten Druckmesswerte sind zum einen verrauscht und zum anderen sind Druckeigenschwingungen des Messvolumens 1 überlagert, was zu weiteren Verfälschungen führt. Aus einer Frequenzanalyse kann aus den Druckmesswerten die Frequenzen der ersten Oberschwingung der Druckeigenschwingungen bestimmt werden, woraus nach der oben angegebenen Beziehung $c = v \cdot L$ die Schallgeschwindigkeit c berechnet wird, die in der verwendeten Prüfflüssigkeit bei den vorliegenden Bedingungen herrscht. Obwohl die ungefähre Größe von c natürlich bekannt ist, kommt es doch zu Schwankungen durch veränderte Zusammensetzungen der Prüfflüssigkeit oder geänderte Temperaturen, was andernfalls zu einer Verminderung der Messgenauigkeit führen würde. Durch eine Filterung der Druckmesswerte durch einen Tiefpass kann hochfrequentes Rauschen unterdrückt werden. Wegen der Anordnung des Drucksensors 20 in der Mitte des Messvolumens kann die Grenzfrequenz v_G für den Tiefpass doppelt so groß gewählt werden, da die erste Grundschwingung vom Drucksensor 20 nicht registriert wird. Die geglätteten Druckmesswerte werden anschließend zeitlich differenziert, und nach Multiplikation mit dem Faktor V/c^2 ergibt sich bei bekanntem Volumen V die Einspritzrate $r(t)$.

Die Schallgeschwindigkeit c kann auch in einem separaten Verfahren bestimmt werden. Hierzu wird vom Schallgeber 21 ein Schallimpuls ausgesandt, der von dem als Schallempfänger dienenden Drucksensor 20 oder von einem separaten Schallempfänger 30 nach einer Laufzeit t_L aufgefangen wird. Aus dem Abstand s von Schallgeber 21 und Drucksensor 20 berechnet sich dann nach

$$c = s / t_L$$

die Schallgeschwindigkeit c . Nach der oben gezeigten Gleichung (II) ergibt sich dadurch sofort die eingespritzte Menge Δm .

5 Figur 3 zeigt den zeitlichen Verlauf von Druck $p(t)$ und dessen Ableitung $dp(t)/dt$ als Funktion der Zeit t in willkürlichen Einheiten U. Der Druck $p(t)$ steigt etwa zum Zeitpunkt $t = 1$ ms auf ein erstes Niveau an und etwa zum Zeitpunkt $t = 2$ ms auf ein zweites, deutlich höheres Niveau. Dies entspricht einer Einspritzung von zuerst einer kleineren Menge Prüfflüssigkeit und in einem Abstand von etwa 1 ms einer größeren Menge. Wird ein Einspritzventil gemessen, wie es für direkteinspritzende, selbstzündende Brennkraftmaschinen verwendet wird, entspricht dies einer Kraftstoffeinspritzung, die sich in eine Pilot- oder Voreinspritzung und eine nachfolgende Haupteinspritzung gliedert. Nachdem das vom Drucksensor 20 gemessene Drucksignal $p(t)$ nach der oben geschilderten Methode geglättet worden ist, ergibt die Ableitung $dp(t)/dt$ einen Wert, der proportional zur Einspritzrate $r(t)$ ist. Durch Multiplikation mit dem Faktor V/c^2 erhält man daraus schließlich den Absolutwert der Einspritzrate $r(t)$.

25 Das Messverfahren zusammen mit dem beschriebenen Messaufbau ermöglicht es also, den Druckverlauf zu messen und die Schallgeschwindigkeit c bei den aktuellen Prüfbedingungen zu bestimmen, woraus sich die Einspritzmenge und die Einspritzrate bestimmen lässt. Wird die Schallgeschwindigkeit c aus der Frequenz der Eigenschwingungen berechnet, so können
30 sämtliche notwendigen Größen aus dem Druckverlauf bestimmt werden, was Fehler durch zusätzliche Bauteile ausschließt. Durch die Anordnung des Drucksensors 20 genau zwischen den beiden Grundflächen 102, 202 kann die Grenzfrequenz v_G des Tiefpassfilters auf die doppelte Frequenz der Grundschwingung v_e angehoben werden, ohne dass eine qualitative Beeinträchtigung durch das Filtern zu erwarten ist. Aufwendige
35

Kalibrierverfahren, bei denen in einem separaten Messverfahren die Schallgeschwindigkeit bestimmt wird, können somit entfallen.

- 5 Die Prüfflüssigkeit kann Kraftstoff sein oder eine andere Flüssigkeit, deren Eigenschaften dem Stoff nahekommen, der im normalen Gebrauch des Einspritzventils verwendet wird. Das Messvolumens 1 muss nicht zylinderförmig ausgebildet sein, sondern statt eines Zylinders kann auch ein quaderförmiges Messvolumen 1 oder eine andere geeignete Form vorgesehen sein, beispielsweise eine Kugel. Der Drucksensor 20 wird auch hier in einem Druckknoten der ersten Druckeigenschwingung des Messvolumens 1 angeordnet, um die Grenzfrequenz für die Filterung möglichst hoch ansetzen zu können.
- 10

5

Ansprüche

10

1. Verfahren zur Messung der Einspritzrate eines Einspritz-
ventils für Flüssigkeiten, vorzugsweise für flüssigen
Kraftstoff, bei dem das Einspritzventil (3) die Flüssig-
keit in ein flüssigkeitsgefülltes Messvolumen (1) ein-
spritzt, wobei das Messvolumen (1) allseitig abgeschlos-
sen ist und im Messvolumen (1) ein Drucksensor (20) ange-
ordnet ist, **gekennzeichnet durch** folgende Verfahrensschritte:

15

20

25

- Einspritzung von Flüssigkeit durch das Einspritzventil (3) in das Messvolumen (1),
- Messung des Drucks ($p(t)$) im Messvolumen (1) mittels des Drucksensors (20) während der Einspritzung und Aufzeichnung dieser Messwerte,
- Bestimmung der Schallgeschwindigkeit (c) im Messvolumen (1),
- Bestimmung der eingespritzten Prüfflüssigkeits-Menge ($m(t)$; Δm) aus den Druckmesswerten ($p(t)$) und der Schallgeschwindigkeit (c).

30

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Druckmesswerte ($p(t)$) während der Einspritzung von einem elektronischen Rechner (28) aufgezeichnet werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Schallgeschwindigkeit (c) mittels eines separaten Messverfahrens bestimmt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Schallgeschwindigkeit aus der Laufzeit eines von einem Schallgeber (21) zu einem Schallempfänger (20; 30) laufenden Schallsignals berechnet wird.
- 5 5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Schallgeschwindigkeit (c) aus den Eigenfrequenzen (v_n) des Messvolumens (1) bestimmt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Eigenfrequenzen (v_n) durch eine Frequenzanalyse der
10 Druckmesswerte ($p(t)$) bestimmt werden.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Druckmesswerte ($p(t)$) mit einem Tiefpassfilter gefiltert werden.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass
15 aus dem Verlauf der Druckmesswerte ($p(t)$) durch zeitliche Differentiation eine der Einspritzrate ($r(t)$) proportionale Größe berechnet wird.
9. Vorrichtung zur Messung der Einspritzrate ($r(t)$) eines Einspritzventils (3) für Flüssigkeiten mit einem Messvolumen (1), das allseitig abgeschlossen ist und mit einer Prüfflüssigkeit gefüllt ist, einer Öffnung (10) in der
20 Wandung (2) des Messvolumens (1) zur Aufnahme eines Einspritzventils (3), so dass das Einspritzventil (3) in Einbaulage mit wenigstens einer Einspritzöffnung (12) in
25 das Messvolumen (1) hineinragt, und einem Drucksensor (20), der im Messvolumen (1) angeordnet ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Drucksensor (20) im Druckknoten der ersten Druckeigenschwingung des Messvolumens (1) angeordnet ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet,
dass das Messvolumen (1) zylinderförmig ausgebildet ist.
11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet,
dass der Drucksensor (20) in der Radialebene angeordnet
5 ist, die mittig zwischen den beiden Grundflächen (102;
202) des Zylinders liegt.
12. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet,
dass ein elektronischer Rechner (28) die Messwerte des
Drucksensors (20) erfasst und speichert.
- 10 13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet,
dass auf dem elektronischen Rechner (28) ein Programm
läuft, das aus den aufgezeichneten Druckmesswerten
(p(t)) die Eigenfrequenzen des Messvolumens (V) berech-
net.
- 15 14. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet,
dass im Messvolumen (V) ein Schallgeber (21) und ein se-
parater Schallempfänger (30) angeordnet sind.

5

Zusammenfassung

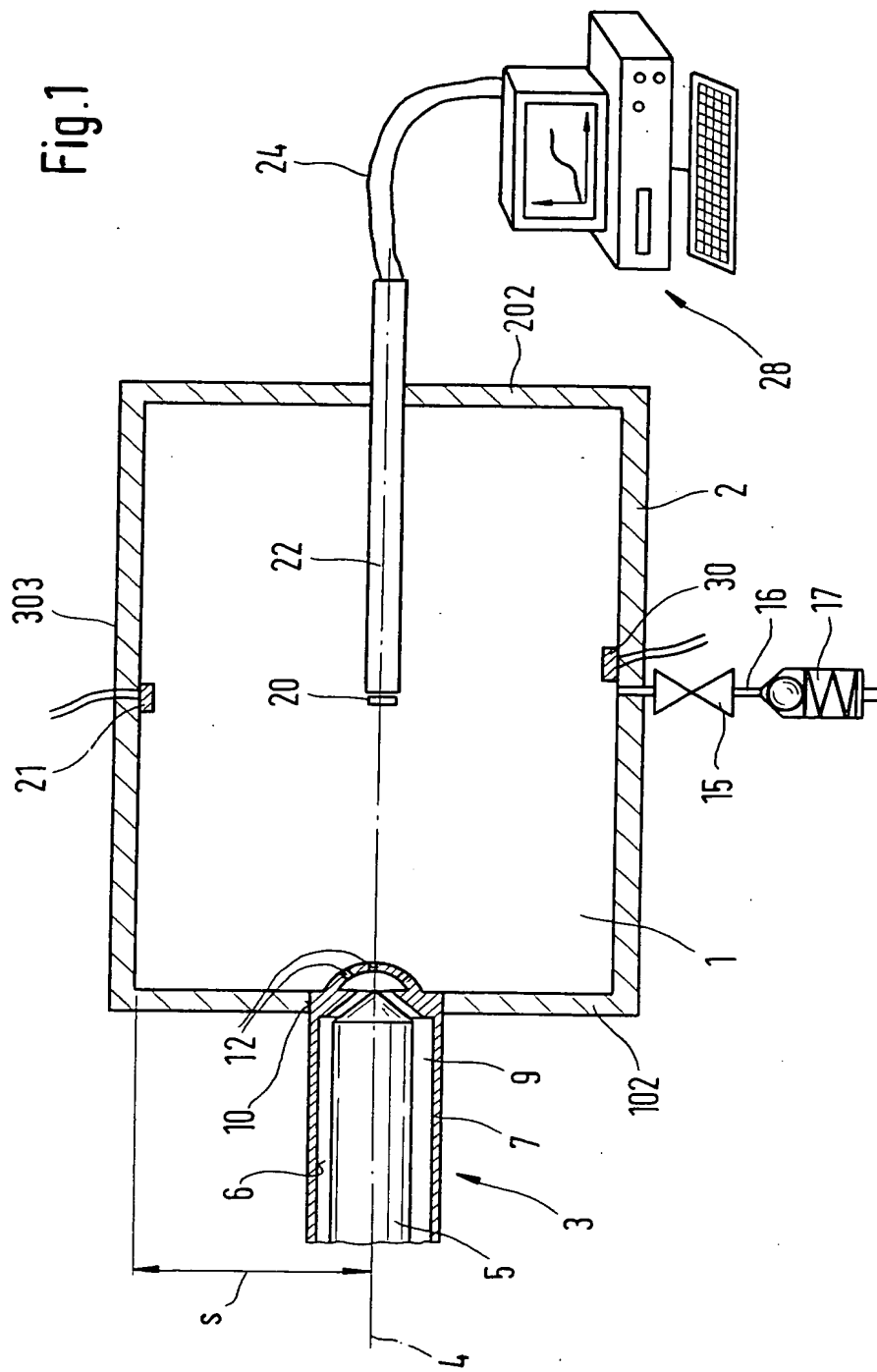
10

15

20

Verfahren zur Messung der Einspritzrate eines Einspritzventils für Flüssigkeiten, vorzugsweise für flüssigen Kraftstoff, bei dem das Einspritzventil (3) die Flüssigkeit in ein flüssigkeitsgefülltes Messvolumen (1) einspritzt, wobei das Messvolumen (1) allseitig abgeschlossen ist und im Messvolumen ein Drucksensor (20) angeordnet ist. Aus den Druckmesswerten $p(t)$ oder durch eine separate Messung wird die Schallgeschwindigkeit bestimmt und damit die Einspritzmenge (Δm) oder der zeitliche Verlauf der Einspritzrate $r(t)$ berechnet. Die Vorrichtung umfasst ein Messvolumen (1), ein Einspritzventil (3), das mit wenigstens einer Einspritzöffnung (12) in das Messvolumen (1) ragt, und einen Drucksensor (20), der im Druckknoten der ersten Druckeigenschwingung des Messvolumens (1) angeordnet ist (Fig. 1).

Fig.1



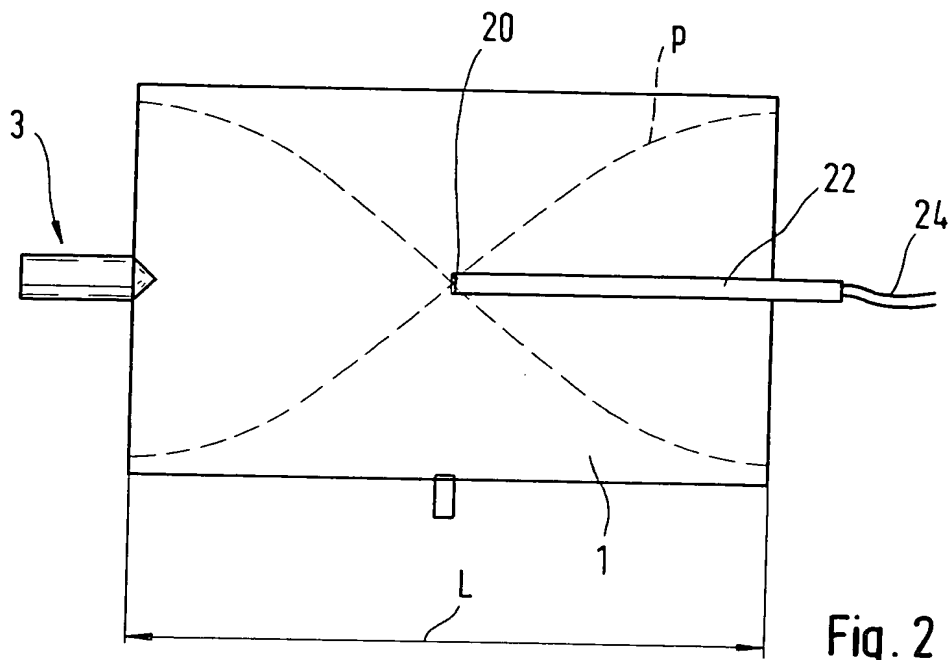


Fig. 2

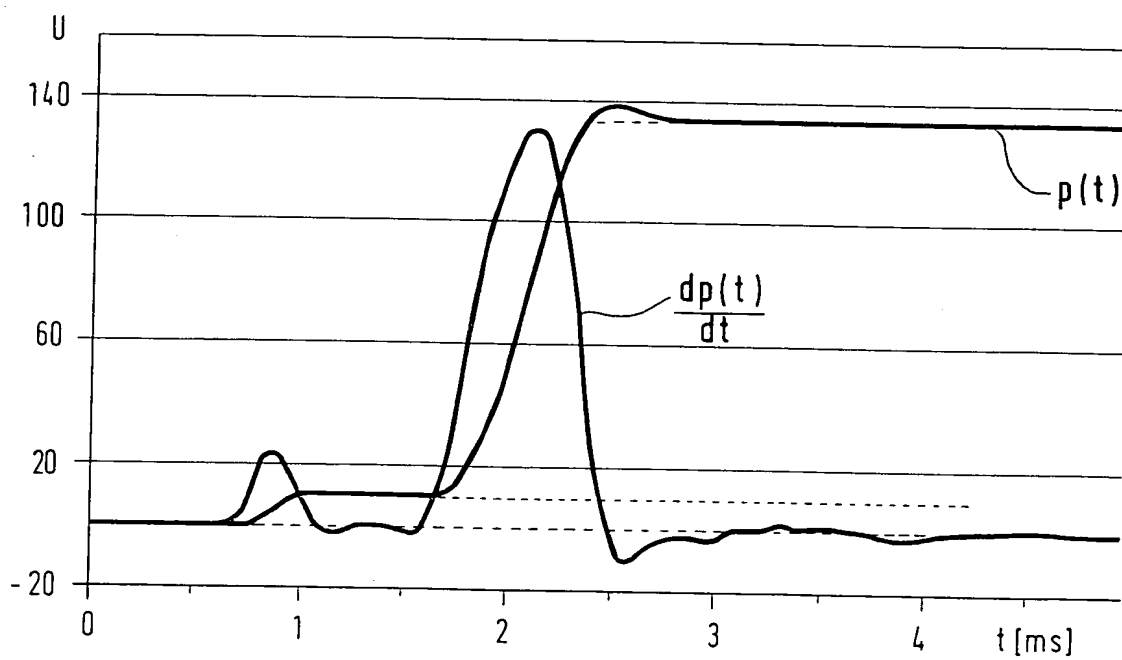


Fig. 3